

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**USO DE BIOESTIMULANTES CON HERBICIDAS Y SUS EFECTOS EN LA  
FITOTOXICIDAD Y RENDIMIENTO DE SOJA**

**por**

**María Belén SOTO CAPOSIS**

**Trabajo final de grado  
presentado como uno de los  
requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo**

**PAYSANDÚ**

**URUGUAY**

**2026**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia

“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



## PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

---

Ing. Agr. (Dra.) Juana Villalba

Tribunal:

---

Ing. Agr. (Dra.) Juana Villalba

---

Ing. Agr. (Mag.) Luciana Rey

---

Ing. Agr. (Mag.) Mauricio Bustamante

Fecha:

10 de febrero de 2026

Estudiante:

---

María Belén Soto Caposis

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de una u otra forma, hicieron posible la realización de este trabajo final de grado.

En primer lugar, agradezco a mi directora académica Juana Villalba por su acompañamiento, orientación y disponibilidad a lo largo de todo el proceso, así como por los aportes técnicos y metodológicos que permitieron dar solidez al trabajo. También agradezco a mi director Ramiro Suarez por la confianza, el apoyo brindado y por facilitar los recursos necesarios para llevar adelante la etapa experimental.

Agradezco a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República por la formación recibida a lo largo de estos años, que sentó las bases para el desarrollo de este trabajo y de mi formación profesional.

Finalmente, agradezco profundamente a mi familia y a mis amigas por el acompañamiento constante, la paciencia y el apoyo incondicional durante esta etapa. Y de manera especial, a mi abuela, que aunque ya no esta, su presencia y sus fuerzas me acompañaron durante todo este camino.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| PÁGINA DE APROBACIÓN.....                                     | 3  |
| AGRADECIMIENTOS .....                                         | 4  |
| RESUMEN.....                                                  | 8  |
| ABSTRACT .....                                                | 9  |
| 1 INTRODUCCIÓN.....                                           | 10 |
| 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....                                 | 12 |
| 2.1 BIOESTIMULANTES .....                                     | 12 |
| 2.2 PROGEN DETOX.....                                         | 13 |
| 2.3 ROL DE LAS FITOHORMONAS .....                             | 15 |
| 2.4 DETOXIFICACIÓN DE HERBICIDAS .....                        | 16 |
| 2.5 NODULACIÓN Y APLICACIÓN DE HERBICIDAS .....               | 17 |
| 2.6 HERBICIDAS.....                                           | 18 |
| 2.6.1 Herbicida fomesafen.....                                | 19 |
| 2.6.2 Herbicida S-metolaclor .....                            | 19 |
| 2.6.3 Herbicida benazolin etil .....                          | 20 |
| 2.7 FITOTOXICIDAD Y RECUPERACIÓN DEL CULTIVO.....             | 20 |
| 3 MATERIALES Y MÉTODOS.....                                   | 22 |
| 3.1 SITIO EXPERIMENTAL.....                                   | 22 |
| 3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL .....                                 | 22 |
| 3.3 TRATAMIENTOS Y DOSIS APLICADAS.....                       | 23 |
| 3.4 IMPLANTACIÓN Y MANEJO DEL CULTIVO .....                   | 23 |
| 3.5 VARIABLES EVALUADAS.....                                  | 25 |
| 3.5.1 Evaluación de fitotoxicidad.....                        | 25 |
| 3.5.2 Evaluación de nodulación .....                          | 27 |
| 3.5.3 Evaluación de maduración del grano.....                 | 27 |
| 3.5.4 Estimación del rendimiento a partir de componentes..... | 28 |

|       |                                               |    |
|-------|-----------------------------------------------|----|
| 3.5.5 | Cosecha experimental y rendimiento final..... | 28 |
| 3.6   | ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....                     | 29 |
| 4     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                   | 30 |
| 4.1   | FITOTOXICIDAD DEL CULTIVO.....                | 30 |
| 4.2   | NODULACIÓN DEL CULTIVO.....                   | 36 |
| 4.3   | RENDIMIENTO FINAL DEL CULTIVO.....            | 37 |
| 5     | CONCLUSIONES.....                             | 41 |
| 6     | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....               | 42 |
| 7     | ANEXOS.....                                   | 46 |

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

### Tabla N°

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> <i>Tratamientos y dosificación aplicados</i> .....                                                        | 23 |
| <b>Tabla 2</b> <i>Escala EWRS utilizada para evaluar fitotoxicidad</i> .....                                             | 26 |
| <b>Tabla 3</b> <i>Fitotoxicidad del cultivo a los 5 días (EWRS). Resultado de Kruskal–Wallis</i> .                       | 30 |
| <b>Tabla 4</b> <i>Fitotoxicidad del cultivo (escala EWRS) a 5 días tras la aplicación según prueba de Friedman</i> ..... | 33 |
| <b>Tabla 5</b> <i>Distribución de categorías EWRS a los 5 días posteriores a la aplicación</i> .....                     | 34 |
| <b>Tabla 6</b> <i>Fitotoxicidad del cultivo (escala EWRS) en distintas fechas de evaluación</i> ....                     | 35 |
| <b>Tabla 7</b> <i>Análisis de la varianza (ANAVA) del score promedio de nodulación del cultivo de soja</i> .....         | 36 |
| <b>Tabla 8</b> <i>Rendimiento final del cultivo de soja (kg ha<sup>-1</sup>). Análisis de la varianza (ANAVA)</i> .....  | 38 |

### Figura N°

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> <i>Plantas correspondientes al tratamiento testigo (TC), sin aplicación, a los 5 días posteriores</i> .....       | 31 |
| <b>Figura 2</b> <i>Síntomas de fitotoxicidad a los 5 días posteriores a la aplicación del tratamiento T3 (S-metolaclor)</i> ..... | 31 |
| <b>Figura 3</b> <i>Síntomas de fitotoxicidad a 5 días en T6 (S-metolaclor + PROGEN Detox)</i> .                                   | 32 |
| <b>Figura 4</b> <i>Rendimiento del cultivo de soja según tratamiento aplicado (kg/ha)</i> .....                                   | 38 |
| <b>Figura 5</b> <i>Precipitaciones y temperatura media quincenal durante la campaña 2024–2025</i> .....                           | 39 |

## RESUMEN

El uso de bioestimulantes en combinación con herbicidas ha sido propuesto como una estrategia para atenuar la expresión de fitotoxicidad en cultivos extensivos y contribuir al mantenimiento del rendimiento. No obstante, la respuesta del cultivo puede variar según el ambiente, el tipo de herbicida y las condiciones de manejo. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el uso de un bioestimulante en mezcla con herbicidas y sus efectos sobre la fitotoxicidad, la nodulación y el rendimiento del cultivo de soja. El ensayo se llevó a cabo en un sitio experimental ubicado en el departamento de San José, Uruguay. Se utilizó un diseño completamente al azar, con siete tratamientos y cinco repeticiones. Los tratamientos consistieron en la aplicación de herbicidas aplicados en postemergencia del cultivo (fomesafen, s- metolaclor y benazolin etil + fomesafen) solos y en combinación con el bioestimulante PROGEN Detox, además de un tratamiento testigo sin aplicación. La fitotoxicidad del cultivo se evaluó a los 5, 14, 30 y 45 días posteriores a la aplicación. La nodulación del cultivo se evaluó en estadios reproductivos R3–R5 y el rendimiento final se determinó a cosecha mediante muestreo en las parcelas experimentales. El análisis estadístico de la fitotoxicidad se realizó mediante pruebas no paramétricas, aplicando la prueba de Kruskal–Wallis en cada fecha de evaluación y la prueba de Friedman para considerar la variabilidad entre repeticiones. La nodulación fue analizada mediante un análisis de la varianza con un modelo que contempló el anidamiento de plantas dentro de parcela, complementado con análisis no paramétricos para las variables individuales. El rendimiento final fue analizado mediante análisis de la varianza. Inicialmente se constataron síntomas de fitotoxicidad en el cultivo, en tratamientos que incluyeron S-metolaclor, dichos síntomas fueron de carácter visual y transitorio, sin persistencia en evaluaciones posteriores, observándose una recuperación progresiva del cultivo a lo largo del ciclo. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas en la fitotoxicidad entre tratamientos con y sin bioestimulante en las evaluaciones posteriores. En la nodulación del cultivo y rendimiento no se comprobaron diferencias significativas entre tratamientos. En síntesis, bajo las condiciones evaluadas, el uso del bioestimulante PROGEN Detox en mezcla con herbicidas no generó efectos diferenciales sobre la fitotoxicidad, la nodulación ni el rendimiento del cultivo de soja, destacándose la importancia del ambiente y de la capacidad de compensación fisiológica del cultivo en la respuesta observada.

*Palabras claves:* soja, bioestimulantes, herbicidas, fitotoxicidad, rendimiento

## ABSTRACT

The use of biostimulants in combination with herbicides has been proposed as a strategy to mitigate the expression of phytotoxicity in field crops and to help maintain yield. However, crop responses may vary depending on environmental conditions, herbicide type, and management practices. In this context, the objective of this study was to evaluate the use of a biostimulant applied in mixture with herbicides and its effects on phytotoxicity, nodulation, and yield in soybean. The experiment was conducted at an experimental site located in the department of San José, Uruguay. A completely randomized design with seven treatments and five replications was used. Treatments consisted of the application of herbicides applied in post-emergence of the crop (fomesafen, S-metolachlor, and benazolin etil + fomesafen), applied alone and in combination with the biostimulant PROGEN Detox, as well as an untreated control. Crop phytotoxicity was evaluated at 5, 14, 30, and 45 days after application. Nodulation was assessed at reproductive stages R3–R5, and final yield was determined at harvest by sampling the experimental plots. Phytotoxicity data were analyzed using non-parametric tests, applying the Kruskal–Wallis test at each evaluation date and the Friedman test to account for variability among replications. Nodulation was analyzed using analysis of variance with a model that considered plant nesting within plots, complemented by non-parametric analyses for individual variables. Final yield was analyzed using analysis of variance. Initial phytotoxicity symptoms were observed in treatments including S-metolachlor; however, these symptoms were visual and transitory, with no persistence in later evaluations, and a progressive crop recovery was observed throughout the growing cycle. No statistically significant differences were detected in phytotoxicity between treatments with and without the biostimulant in subsequent evaluations. Likewise, no significant differences were found in nodulation or yield among treatments. In summary, under the evaluated conditions, the use of the biostimulant PROGEN Detox in mixture with herbicides did not generate differential effects on phytotoxicity, nodulation, or yield in soybean, highlighting the importance of environmental conditions and the crop's physiological compensation capacity in the observed response.

*Keywords:* soybean, biostimulants, herbicides, phytotoxicity, yield

## 1 INTRODUCCIÓN

La soja (*Glycine max*) es uno de los cultivos agrícolas más relevantes a nivel mundial, tanto por su valor económico como por su rol estratégico en la producción de alimentos, aceites y biocombustibles. En Uruguay, este cultivo ha experimentado una expansión sostenida desde los años 2000, consolidándose como un pilar de la agricultura de secano gracias a su adaptabilidad a los sistemas de rotación y a su rentabilidad (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2024). Actualmente, la superficie sembrada alcanza aproximadamente 1.740.000 hectáreas (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2024) lo que representa un incremento de cinco veces respecto a las cifras del inicio del siglo donde se explotaban en torno a 350.000 ha (Ernst & Siri-Prieto, 2011).

Ahora bien, este aumento de área ha impulsado la incorporación de diversas tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia productiva y a maximizar el rendimiento, en un contexto marcado por la creciente demanda global. Entre los desafíos fitosanitarios que enfrenta el cultivo de soja, el control de malezas es uno de los más importantes. El uso de herbicidas es fundamental para asegurar los rendimientos potenciales del cultivo, pero su aplicación puede generar efectos fitotóxicos, especialmente cuando coinciden con condiciones ambientales adversas o se realizan en etapas fenológicas sensibles (Barbaś et al., 2024).

En este escenario, los bioestimulantes han cobrado protagonismo como herramientas complementarias para mitigar los efectos negativos. Estos productos, elaborados a partir de sustancias naturales como extractos vegetales, micronutrientes y fitohormonas, pueden mejorar la tolerancia al estrés, favorecer la recuperación fisiológica del cultivo y de esa forma potenciar el crecimiento y rendimiento (Di Sario et al., 2025).

El bioestimulante en estudio, comercialmente se denomina PROGEN Detox, es un producto que presenta la combinación de elementos nutricionales (NPK + Mn) y reguladores de crecimiento vegetal (ácido salicílico, ácido jasmónico, ACC y citoquininas), que actúan sobre distintas rutas metabólicas asociadas a la tolerancia al estrés biótico y abiótico.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el impacto del uso combinado del bioestimulante PROGEN Détox, con diferentes herbicidas, analizando su efecto sobre la

fitotoxicidad y rendimiento en el cultivo de soja. A través de esta evaluación, se busca aportar información útil para optimizar el manejo químico en el cultivo.

## **2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 BIOESTIMULANTES**

Los bioestimulantes son productos formulados que contienen sustancias y/o microorganismos que, al ser aplicados sobre las plantas o en la rizosfera, activan procesos fisiológicos naturales (International Fertilizer Association [IFA], s.f.). Su finalidad es mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos, así como optimizar la absorción y el uso eficiente de nutrientes, además de aumentar la tolerancia de las plantas frente a situaciones de estrés (IFA, s.f.).

Debido a su falta de precisión, la definición de bioestimulante ha generado confusión en el mercado, donde el término se aplica a una gran variedad de productos. Estos pueden incluir desde extractos vegetales y animales, hasta mezclas con compuestos bien establecidos como nutrientes, vitaminas o reguladores del crecimiento (Saborío, 2002).

Según Yakhin et al. (2017), los bioestimulantes son sustancias basadas principalmente en materias primas de origen natural, aplicadas en dosis muy bajas, cuyo objetivo es modificar procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas para optimizar la productividad y el potencial genético de los cultivos. Asimismo, Yakhin et al. (2017) señalan que estos efectos se asocian, entre otros aspectos, a cambios en el estatus hormonal, incremento en la eficiencia nutricional, estimulación del crecimiento y desarrollo, y fortalecimiento de la planta frente a condiciones de estrés.

Los mecanismos de acción de los bioestimulantes pueden incluir la penetración y translocación dentro de los tejidos vegetales, la activación de vías de señalización hormonal y la modulación de la expresión génica, así como impactos sobre procesos metabólicos como la fotosíntesis, la respiración y la transpiración (Yakhin et al., 2017).

Es importante destacar ciertos beneficios de los bioestimulantes en cultivos, estos fomentan el desarrollo de microorganismos benéficos en la rizosfera; mejoran la resistencia a estrés biótico y abiótico; potencian el crecimiento y desarrollo vegetal; mejoran la eficiencia del uso del agua y nutrientes y por último aumentan los rendimientos y calidad de los cultivos (Yakhin et al., 2017).

Se debe tener en cuenta que se requiere un manejo integral productivo para que el bioestimulante exprese su potencial, ya sea controlando los factores limitantes (agua, nutrientes y suelo) como los reductores (malezas, enfermedades y plagas).

Según Ingeplant Ingeniería en Nutrición de Cultivos (2022) los bioestimulantes son insumos que favorecen la sostenibilidad agrícola, ya que, al aplicarse en bajas concentraciones, tienen la capacidad de potenciar la producción de los cultivos. Debido a su origen natural y su carácter inocuo para el ambiente, estos productos generalmente presentan bajo riesgo de fitotoxicidad cuando se usan según recomendación, lo que los convierte en una opción segura. Además, favorecen los procesos de desintoxicación y ayudan a mitigar el estrés oxidativo en los cultivos, lo que contribuye a mejorar su salud y rendimiento.

## **2.2 PROGEN DETOX**

De acuerdo con información técnica provista por la empresa desarrolladora (Timac Agro, comunicación personal, 2024), PROGEN Detox es un bioestimulante con un efecto anti estresante preventivo, diseñado para ayudar a las plantas a tolerar diversas situaciones de estrés abiótico y biótico, con especial énfasis en el estrés oxidativo. Este producto puede aplicarse en cualquier etapa del cultivo y se lo propone para ser utilizado en combinación con fitosanitarios, como herbicidas, con el objetivo de atenuar la expresión de fitotoxicidad asociada a su aplicación.

El principio activo de PROGEN Detox está compuesto por una combinación de hormonas vegetales y nutrientes esenciales. Entre sus componentes se encuentran el ácido salicílico (SA), el ácido jasmónico (JA), el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), precursor del etileno, y citoquininas (CK). Además, contiene nutrientes NPK (2-0/0-3) y 1% de manganeso (Mn). Estos compuestos actúan como señales hormonales y moduladores fisiológicos, y están involucrados en la regulación de las defensas de la planta y en la activación de respuestas adaptativas frente a factores de estrés (Timac Agro, comunicación personal, 2024).

El estrés oxidativo, uno de los principales desafíos que enfrentan las plantas, ocurre cuando la planta está expuesta a situaciones como la aplicación de herbicidas, sequía, calor o enfermedades. En estas condiciones, la planta aumenta la producción de radicales libres (ROS), que pueden dañar lípidos, proteínas y ADN, afectando

negativamente el crecimiento y reduciendo el rendimiento. Se plantea que el producto puede contribuir a la mitigación del estrés mediante el aporte de hormonas vegetales naturales, las cuales actuarían como señales fisiológicas tempranas involucradas en la activación de mecanismos de defensa de la planta. De esta forma, mejora el estado fisiológico de la planta y permite que este enfrente de manera más eficiente los fitosanitarios sin comprometer su rendimiento (Timac Agro, comunicación personal, 2024).

En este sentido, de acuerdo con información técnica provista por la empresa Timac Agro, PROGEN Detox ha sido evaluado en ensayos a campo en el cultivo de soja en combinación con herbicidas de uso frecuente, tales como glifosato, clethodim, fomesafen, entre otros (Timac Agro, comunicación personal, 2024).

En dichos ensayos se reportó, en algunos ambientes, una reducción en la expresión visual de fitotoxicidad posterior a la aplicación de estos herbicidas, así como respuestas productivas variables en función del herbicida utilizado, el estado del cultivo y las condiciones ambientales. En determinados casos, se registraron incrementos de rendimiento respecto a los tratamientos sin bioestimulante, mientras que en otros no se observaron diferencias relevantes (Timac Agro, comunicación personal, 2024).

Estos antecedentes sugieren un posible efecto mitigador del estrés químico inducido por herbicidas en soja; no obstante, las respuestas reportadas no fueron consistentes entre ensayos y dependieron fuertemente del contexto productivo en el que se evaluó el producto (Timac Agro, comunicación personal, 2024).

Según AgroEfetiva (2021) además de su efecto anti estresante, el Detox ha sido sometido a una serie de estudios de compatibilidad desarrollados en Brasil, donde se evaluó su comportamiento al mezclarse con distintos herbicidas, incluyendo las formulaciones de glifosato más frecuentes en el mercado, así también como con distintas fuentes de agua. El producto también fue sometido a pruebas de pH, tensión superficial, densidad y viscosidad, mostrando parámetros dentro de los rangos normales para su uso en mezclas en tanque. En total, se evaluaron más de 40 tratamientos diferentes, sin observarse reacciones adversas ni inestabilidad en las formulaciones. Los resultados confirmaron que PROGEN Detox es completamente compatible, brindando seguridad en cuanto a su estabilidad físico-química. Esto permite su incorporación práctica en

aplicaciones junto a otros insumos, constituyéndose como un bioestimulante listo para ser utilizado directamente en campo.

### **2.3 ROL DE LAS FITOHORMONAS**

Las fitohormonas, parte de la formulación del producto en estudio, son también conocidas como hormonas vegetales o fitorreguladores. Son moléculas orgánicas que se producen en cualquier tipo de planta, en concentración baja, ya sean plantas terrestres o acuáticas (Jordán & Casaretto, 2006). Ahora bien, Porta y Jiménez-Nopala (2019) indican que estas son caracterizadas por tener efectos fisiológicos en todo ciclo de vida de una planta relacionados específicamente con el crecimiento y la división celular, como también en participar en procesos de embriogénesis, germinación, maduración floración, formación de frutos y senescencia.

Las fitohormonas, también denominadas hormonas vegetales o fitorreguladores, son moléculas orgánicas producidas naturalmente por las plantas en muy bajas concentraciones, que regulan procesos fisiológicos a lo largo de todo su ciclo de vida, incluyendo crecimiento, desarrollo y respuestas frente a situaciones de estrés (Jordán & Casaretto, 2006).

Ante la aplicación de herbicidas, las plantas pueden experimentar un estrés químico transitorio que activa distintos mecanismos fisiológicos de ajuste y recuperación. En este contexto, la respuesta del cultivo no depende de una única fitohormona, sino de la acción coordinada de varias de ellas, cuya participación varía según el estadio fenológico y el tejido afectado (Alcántara Cortes et al., 2019; Egamberdieva et al., 2017).

Durante los estadios vegetativos tempranos (V3–V4), la soja presenta una elevada plasticidad fisiológica, lo que le permite compensar daños iniciales mediante procesos de reorganización metabólica y hormonal (Asunción-Cruz et al., 2021). En estas etapas, fitohormonas como las auxinas, las giberelinas, las citoquininas y el ácido abscísico cumplen funciones complementarias en la regulación del crecimiento y en la capacidad de recuperación frente al estrés (Asunción-Cruz et al., 2021).

Las auxinas participan en la elongación celular y en el desarrollo del sistema radicular, contribuyendo a la reorganización estructural de la planta luego de un evento de estrés. Por su parte, las giberelinas están asociadas al alargamiento de entrenudos y a la expansión foliar, procesos relevantes para la recuperación del crecimiento aéreo tras

una inhibición temporal (Alcántara Cortes et al., 2019; Porta & Jiménez-Nopala, 2019). El ácido abscísico (ABA) interviene en la regulación de las respuestas al estrés, especialmente a través del control estomático y del ajuste metabólico, permitiendo a la planta adaptarse a condiciones adversas de corta duración (Alcántara Cortes et al., 2019; Porta & Jiménez-Nopala, 2019).

Dentro de este conjunto de fitohormonas, las citoquininas adquieren particular importancia en el presente estudio, dado que forman parte de la formulación del bioestimulante PROGEN Detox. Estas hormonas están involucradas en la división celular y en la regeneración de tejidos, especialmente en zonas meristemáticas, y se asocian a la reducción de síntomas visuales de fitotoxicidad, como clorosis o necrosis foliar, observados en etapas tempranas posteriores a la aplicación de herbicidas (Asunción-Cruz et al., 2021).

De forma complementaria, diversos nutrientes minerales actúan como cofactores en los procesos hormonales y en las rutas antioxidantes involucradas en la respuesta al estrés. Micronutrientes como Mn, Zn, Fe y Mg participan en sistemas enzimáticos de defensa celular, mientras que la relación Ca/K contribuye a la estabilidad de las membranas y al transporte de nutrientes en tejidos afectados por herbicidas (Egamberdieva et al., 2017). De estos micronutrientes, el DETOX contiene Mn en una concentración de 1% (Timac Agro, comunicación personal, 2024).

En conjunto, estos mecanismos fisiológicos permiten comprender la respuesta del cultivo de soja frente a la aplicación de herbicidas y sirven de base para analizar el posible rol de los bioestimulantes en los procesos de recuperación del cultivo.

## **2.4 DETOXIFICACIÓN DE HERBICIDAS**

La detoxificación de herbicidas es un proceso fisiológico mediante el cual las plantas transforman, neutralizan y almacenan en compartimentos celulares específicos compuestos químicos potencialmente tóxicos, permitiendo su supervivencia y explicando, en gran medida, la selectividad de numerosos herbicidas utilizados en agricultura (Anzalone, 2010).

Según Anzalone (2010) este proceso involucra una serie de reacciones bioquímicas organizadas en distintas fases. En la Fase I (transformación), el herbicida sufre modificaciones químicas iniciales, tales como oxidación, reducción o hidrólisis,

mediadas por sistemas enzimáticos como citocromos, peroxidasas y oxigenasas. Estas reacciones pueden reducir o, en algunos casos, aumentar transitoriamente la reactividad del compuesto (Anzalone, 2010).

Posteriormente, en la Fase II (conjugación), los metabolitos generados son conjugados con moléculas endógenas como glutatión, glucosa o malonato, lo que disminuye su toxicidad y facilita su transporte dentro de la célula vegetal. Finalmente, en la Fase III (compartimentalización), los compuestos conjugados son almacenados en vacuolas o incorporados a la pared celular, evitando su interacción con procesos metabólicos sensibles (Anzalone, 2010).

La eficiencia de estos mecanismos varía entre especies y estadios de desarrollo, y constituye uno de los principales factores que determinan la tolerancia diferencial de los cultivos frente a la aplicación de herbicidas. En este sentido, la soja presenta una reconocida capacidad de metabolización y compensación a distintos principios activos, lo que le permite recuperarse de episodios de estrés químico cuando estos no coinciden con etapas críticas del ciclo del cultivo (Rojas Garcidueñas & Gámez González, 2002).

En consecuencia, la presencia de síntomas visuales de fitotoxicidad no implica necesariamente una afectación permanente del crecimiento o del rendimiento, siendo fundamental interpretar dichos síntomas en función de su intensidad, duración y del contexto fisiológico del cultivo (Anzalone, 2010).

## **2.5 NODULACIÓN Y APLICACIÓN DE HERBICIDAS**

La fijación biológica de nitrógeno constituye un proceso clave en el cultivo de soja, dado que la simbiosis entre la planta y bacterias del género *Bradyrhizobium* permite cubrir una proporción significativa de los requerimientos nitrogenados del cultivo. Este proceso depende de una compleja interacción fisiológica entre la raíz y el microorganismo, involucrando señales químicas, formación de nódulos y actividad de la enzima nitrogenasa, altamente sensible a variaciones en el ambiente y al estado metabólico de la planta (Taiz et al., 2015).

La formación y funcionamiento de los nódulos requiere un adecuado equilibrio energético y fisiológico del cultivo. En situaciones de estrés, ya sea hídrico, térmico o químico, puede verse comprometida la actividad de la nitrogenasa y, en consecuencia, la fijación de nitrógeno (Taiz et al., 2015). En este sentido, la aplicación de herbicidas

representa un factor potencial de interferencia, tanto por su acción directa sobre la planta como por posibles efectos sobre los microorganismos simbioses presentes en el suelo.

Diversos estudios han evaluado la interacción entre herbicidas y nodulación en soja. Zobiolo et al. (2010) reportaron que determinados herbicidas pueden afectar la actividad microbiana del suelo y la eficiencia simbiótica, dependiendo del principio activo y de la dosis aplicada. En particular, se ha documentado que herbicidas sistémicos como el glifosato pueden acumularse en los nódulos radiculares, alterando procesos metabólicos asociados a la fijación biológica de nitrógeno (King et al., 2001). Si bien estos efectos no siempre se traducen en reducciones significativas de rendimiento, evidencian que la nodulación puede ser sensible a la presencia de compuestos herbicidas en el sistema suelo-planta.

Asimismo, herbicidas con actividad residual en el suelo pueden interactuar con la microbiota edáfica y con las bacterias fijadoras de nitrógeno, generando respuestas variables según el tipo de molécula, las condiciones ambientales y las características del suelo (Gonzalez et al., 1999). En este marco, la magnitud del efecto depende de múltiples factores, incluyendo la persistencia del herbicida, su movilidad y la capacidad de degradación microbiana.

En conjunto, estos antecedentes indican que la nodulación del cultivo de soja puede verse influenciada por la aplicación de herbicidas, especialmente cuando estos generan condiciones de estrés fisiológico o interactúan con el ambiente edáfico.

## **2.6 HERBICIDAS**

Los herbicidas son herramientas fundamentales en los sistemas agrícolas modernos para el control de malezas, permitiendo reducir la competencia por recursos como agua, luz y nutrientes, y contribuyendo a la estabilidad productiva de los cultivos. Sin embargo, su aplicación implica la introducción de compuestos químicos que interfieren en procesos fisiológicos esenciales de las plantas, por lo que su selectividad depende de la capacidad diferencial de los cultivos para tolerar y metabolizar dichos principios activos (Caseley, 1996; Rojas Garcidueñas & Gámez González, 2002).

En cultivos selectivos como la soja, la correcta elección del herbicida, la dosis y el momento de aplicación resultan determinantes para minimizar la ocurrencia de fitotoxicidad y permitir que el cultivo complete su ciclo sin comprometer el rendimiento.

### 2.6.1 Herbicida fomesafen

El fomesafen es un herbicida selectivo utilizado en el cultivo de soja para el control de malezas latifoliadas en aplicaciones postemergentes. Pertenecce al grupo de los difenil éteres y actúa mediante la inhibición de la enzima protoporfirinógeno oxidasa (PPO), involucrada en procesos clave de la biosíntesis de clorofila (Rojas Garcidueñas & Gámez González, 2002).

La inhibición de esta enzima provoca la acumulación de compuestos fotoactivos que, en presencia de luz, generan daño oxidativo a nivel celular, manifestándose principalmente como clorosis localizada y lesiones necróticas en los tejidos afectados. Este tipo de herbicidas presenta una acción predominantemente de contacto, aunque puede mostrar cierto comportamiento sistémico en condiciones particulares (*Fomeflag*, s.f.).

En soja, la selectividad del fomesafen se basa en la capacidad del cultivo para tolerar el herbicida cuando se aplica en los estadios fenológicos y dosis recomendadas. No obstante, bajo determinadas condiciones ambientales o de manejo, pueden observarse síntomas transitorios de fitotoxicidad, los cuales generalmente no se traducen en pérdidas de rendimiento cuando el cultivo logra recuperarse adecuadamente (*Fomeflag*, s.f.).

### 2.6.2 Herbicida S-metolaclor

El S-metolaclor es un herbicida preemergente de acción sistémica, perteneciente al grupo de las cloroacetamidas, utilizado para el control de malezas gramíneas y algunas latifoliadas en distintos cultivos extensivos, incluida la soja (Caseley, 1996; *S-Maestro*, s.f.).

Su mecanismo de acción se asocia a la interferencia en procesos metabólicos esenciales para el crecimiento de tejidos jóvenes, particularmente aquellos relacionados con la formación y elongación celular (Caseley, 1996). El herbicida es absorbido principalmente por las raíces y los brotes en desarrollo, lo que explica su eficacia en estadios tempranos de las malezas (Caseley, 1996).

Según Rojas Garcidueñas y Gámez González (2002) la selectividad del S-metolaclor en soja depende de la capacidad del cultivo para metabolizar el principio activo, permitiendo su uso sin afectar de manera permanente el desarrollo del cultivo. Sin

embargo, en determinadas situaciones, especialmente cuando se favorece su absorción, pueden observarse manifestaciones temporales de estrés en el cultivo, asociadas a la alteración de procesos fisiológicos iniciales (Rojas Garcidueñas & Gámez González, 2002).

### **2.6.3 Herbicida benazolin etil**

Según *Fomeflag Plus* (s.f.) el benazolin etil es un herbicida selectivo de acción sistémica, perteneciente al grupo de los reguladores del crecimiento, utilizado para el control de malezas latifoliadas en postemergencia del cultivo de soja. Su absorción ocurre principalmente a través del follaje, desde donde es traslocado por el floema hacia los tejidos de crecimiento activo de las malezas susceptibles (*Fomeflag Plus*, s.f.).

Su mecanismo de acción se basa en la alteración de los procesos hormonales normales de las plantas sensibles, lo que provoca desórdenes fisiológicos que derivan en la inhibición del crecimiento y, posteriormente, en la muerte de la maleza. Cuando se aplica respetando las dosis y los estadios fenológicos recomendados, el benazolin etil mantiene un adecuado nivel de selectividad para el cultivo de soja. No obstante, bajo determinadas condiciones ambientales o de manejo, su aplicación puede generar síntomas visuales de fitotoxicidad transitoria en el cultivo, tales como clorosis leve o retrasos temporales en el crecimiento (*Fomeflag Plus*, s.f.). Estos síntomas suelen manifestarse en etapas tempranas posteriores a la aplicación y, en general, no se asocian a efectos negativos sobre el rendimiento final del cultivo (*Fomeflag Plus*, s.f.).

En este trabajo, este herbicida se encontraba en una formulación comercial que es una mezcla con fomesafen.

## **2.7 FITOTOXICIDAD Y RECUPERACIÓN DEL CULTIVO**

La manifestación de síntomas de fitotoxicidad en cultivos selectivos no implica necesariamente un impacto negativo sobre el rendimiento. Tal como señalan Rojas Garcidueñas y Gámez González (2002) así como Anzalone (2010), la capacidad de las plantas para detoxificar y metabolizar herbicidas es un factor clave en la selectividad y seguridad de uso de estos productos.

En este sentido, la soja presenta mecanismos fisiológicos que le permiten tolerar y compensar episodios de estrés químico de corta duración, siempre que estos no

coincidan con períodos críticos del desarrollo. La interpretación agronómica de la fitotoxicidad debe considerar no solo la presencia de síntomas visuales, sino también su intensidad, duración y la capacidad de recuperación del cultivo (Anzalone, 2010; Yakhin et al., 2017).

### **3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 SITIO EXPERIMENTAL**

El experimento se llevó a cabo durante la campaña agrícola 2024–2025 en el campo experimental de AGrI+D, ubicado sobre Ruta 3, km 70, en la zona de Villa María, departamento de San José, Uruguay. El sitio se caracteriza por presentar un clima templado, típico de la región sur del país, con condiciones favorables para el cultivo de soja durante el período estival.

El suelo del área experimental pertenece al grupo CONEAT 10.8b, correspondiente a suelos desarrollados sobre sedimentos limo–arcillosos, con relieve suavemente ondulado y pendientes predominantes entre 1 y 4% (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP], 1979). Estos suelos presentan textura franco–arcillo–limosa, color pardo oscuro a negro, fertilidad natural alta y drenaje moderadamente bueno, lo que los hace aptos para la agricultura extensiva (MGAP, 1979).

Previo a la instalación del ensayo se realizó un análisis físico–químico del suelo, el cual indicó niveles adecuados de fertilidad, por lo que no se consideró necesaria la aplicación de fertilizantes al momento de la siembra. El lote presentó condiciones edáficas y topográficas homogéneas, permitiendo la instalación del experimento sin la necesidad de aplicar correcciones diferenciales. Los resultados completos del análisis de suelo se presentan en el Anexo A.

#### **3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

El ensayo se instaló bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA), conformado por seis tratamientos más un testigo sin aplicación (TC), con cinco repeticiones por tratamiento. La elección de un DCA se justificó en que el lote presentó condiciones edáficas y topográficas homogéneas, sin identificarse gradientes marcados que requirieran el uso de bloques.

Cada parcela tuvo una superficie total de 12 m<sup>2</sup> (3 m × 4 m). Para la aplicación de los tratamientos se utilizó un área efectiva de 8 m<sup>2</sup>, dejando un metro adicional sin aplicación como testigo apareado, con el objetivo de facilitar la comparación visual entre plantas tratadas y no tratadas bajo condiciones micro ambientales similares.

### 3.3 TRATAMIENTOS Y DOSIS APLICADAS

Se evaluaron seis tratamientos con herbicidas, aplicados solos o en combinación con el producto PROGEN Detox, además de un testigo sin aplicación. Los tratamientos se definieron en función de distintos principios activos y combinaciones, manteniendo las dosis recomendadas a nivel comercial para el cultivo de soja.

Las dosis se expresaron en litros por hectárea ( $L\ ha^{-1}$ ) y se ajustaron proporcionalmente al área efectiva de cada parcela resultando en un volumen de aplicación de  $100\ L\ ha^{-1}$ . Las dosis aplicadas reflejaron fielmente las recomendaciones comerciales y permitieron evaluar el efecto de cada principio activo y su interacción con el bioestimulante.

**Tabla 1**

*Tratamientos y dosificación aplicados*

| Tratamiento | Ingrediente activo                            | Dosis ( $L\ ha^{-1}$ ) |
|-------------|-----------------------------------------------|------------------------|
| TC          | Sin aplicación                                | —                      |
| T1          | Fomesafen (FOMEFLAG)                          | 1,0                    |
| T2          | Fomesafen + Benazolin etil<br>(FOMEFLAG PLUS) | 1,2                    |
| T3          | S-metolaclor                                  | 0,8                    |
| T4          | Fomesafen + Detox                             | 1,0 + 0,4              |
| T5          | Fomesafen + Benazolin etil +<br>Detox         | 1,2 + 0,4              |
| T6          | S-metolaclor + Detox                          | 0,8 + 0,4              |

### 3.4 IMPLANTACIÓN Y MANEJO DEL CULTIVO

El cultivo correspondió a una soja de primera, implantada sobre un barbecho químico. Treinta días previos a la siembra se realizó un control de malezas mediante la

aplicación de 2,4-D amina al 48% (2 L ha<sup>-1</sup>) en mezcla con cletodim al 24% (0,8 L ha<sup>-1</sup>). Debido a la ocurrencia de precipitaciones que retrasaron la fecha prevista de siembra, y con el objetivo de asegurar un adecuado control de las malezas emergidas, se realizó una aplicación complementaria de Paraquat (2 L ha<sup>-1</sup> de Producto comercial) el día previo a la siembra.

Este manejo permitió minimizar la competencia inicial del cultivo y asegurar condiciones adecuadas para su implantación.

La variedad utilizada fue DM 60I62 IPRO, semilla comercial inoculada, seleccionada por su adaptación a las condiciones productivas de la región. La siembra del cultivo se realizó el 8 de noviembre de 2024. Posteriormente, el 4 de diciembre de 2024 se evaluó el stand de plantas, verificándose la correcta emergencia y la distribución de las plántulas en las parcelas.

Los tratamientos experimentales fueron aplicados el 19 de diciembre de 2024, cuando las plantas se encontraban en estadios vegetativos V3–V4, momento considerado adecuado para la aplicación de los herbicidas evaluados. La aplicación se realizó de forma manual, utilizando un equipo de pulverización de cuatro picos, con una barra de 2 m de largo, calibrado para asegurar una cobertura homogénea sobre el área efectiva de cada parcela.

Durante la aplicación se registraron las condiciones ambientales mediante un anemómetro portátil. La velocidad del viento se mantuvo entre 2,1 y 3,9 km h<sup>-1</sup>, la temperatura ambiente fue de 23,2 °C y la humedad relativa alcanzó valores cercanos al 74,3%. Estas condiciones se consideraron adecuadas, ya que la baja velocidad del viento redujo el riesgo de deriva, la temperatura se mantuvo dentro de un rango seguro para minimizar la volatilización de los herbicidas y la elevada humedad relativa favoreció la absorción de las gotas por parte del cultivo.

Durante el desarrollo del ensayo se registró la presencia de malezas en las parcelas experimentales, las que fueron retiradas en forma manual, mediante el uso de asada, principalmente para el control de capín (*Echinochloa* spp.), especie predominante en el lote. Este control se realizó el 18 de diciembre de 2024, previo a la aplicación de los tratamientos experimentales, con el fin de mantener condiciones lo más homogéneas

posibles entre parcelas. De esta forma se impidió la interferencia con la evaluación de los tratamientos herbicidas aplicados en el marco del experimento.

Durante las evaluaciones de fitotoxicidad se observó la presencia de síntomas de tizón foliar en el estrato inferior de las plantas, los cuales se manifestaron de forma generalizada, incluso en parcelas testigo. Se consideró que estos síntomas podrían estar asociados a la semilla y a la ocurrencia de condiciones ambientales predisponentes, tales como eventos de lluvia y prolongados períodos de mojado foliar, más allá de que la semilla se encontraba inoculada.

En la evaluación realizada el 3 de enero de 2025 se registró, además, la presencia de insectos y daño por masticadores en distintas parcelas del experimento. En función de estas observaciones, y con el objetivo de evitar que este factor interfiriera en el desarrollo del cultivo y en la interpretación de los tratamientos evaluados, el 4 de enero de 2025 se realizó una aplicación de Lambda Cialotrina en mezcla con Clorpirifos.

### **3.5 VARIABLES EVALUADAS**

#### **3.5.1 Evaluación de fitotoxicidad**

La fitotoxicidad del cultivo fue evaluada mediante observaciones visuales, utilizando la escala EWRS (European Weed Research Society), la cual clasifica el daño en una escala ordinal, donde 1 indica ausencia de síntomas y valores crecientes representan mayor severidad del daño, según la adaptación presentada por Kuttel et al. (2016).

Con el fin de facilitar la comprensión del sistema de evaluación utilizado, en la tabla 2 se presenta la descripción completa de la escala EWRS empleada en este estudio.

Las evaluaciones se realizaron en cuatro momentos posteriores a la aplicación de los tratamientos, correspondientes a 5, 14, 30 y 45 días después de la aplicación, coincidiendo con los siguientes estados fenológicos del cultivo:

- V3–V4: 24 de diciembre de 2024
- V6–V7: 3 de enero de 2025
- V8–V9: 17 de enero de 2025
- R1: 31 de enero de 2025

En cada fecha, cada parcela fue evaluada de forma individual, considerando la presencia de síntomas tales como clorosis, necrosis, deformaciones foliares y diferencias en el vigor general de las plantas. A partir de estas observaciones se asignó un valor EWRS representativo del estado del cultivo en cada parcela.

**Tabla 2**

*Escala EWRS utilizada para evaluar fitotoxicidad*

| <b>Valor</b>                   | <b>Efecto en la Maleza</b> | <b>% Control Maleza</b> | <b>Efecto en el Cultivo</b>                   | <b>% Fitotoxicidad</b> |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|
| 1                              | Muerte completa            | 99,0 – 100              | Sin efecto                                    | 0,0 – 1,0              |
| 2                              | Muy buen control           | 96,5 – 99,0             | Síntomas muy ligeros                          | 1,0 – 3,0              |
| 3                              | Buen control               | 90,0 – 96,5             | Síntomas ligeros                              | 3,0 – 7,5              |
| 4                              | Suficiente en la práctica  | 85,0 – 90,0             | Síntomas que no se reflejan en el rendimiento | 7,5 – 12,5             |
| <b>Límite de aceptabilidad</b> |                            |                         |                                               |                        |
| 5                              | Control medio              | 80,0 – 85,0             | Daño medio                                    | 12,5 – 20,0            |
| 6                              | Regular                    | 70,0 – 80,0             | Daño elevado                                  | 20,0 – 30,0            |
| 7                              | Control muy pobre          | 50,0 – 70,0             | Daños muy severos                             | 30,0 – 50,0            |
| 8                              | Pobre                      | 30,0 – 50,0             | Muerte parcial                                | 50,0 – 70,0            |
| 9                              | Sin efecto                 | 0,0 – 30,0              | Muerte completa                               | 90,0 – 100             |

*Nota.* Escala EWRS adaptada de Kuttel et al. (2016).

### 3.5.2 Evaluación de nodulación

La evaluación de la nodulación se realizó el 13 de febrero de 2025, cuando las plantas de soja se encontraban en estadios reproductivos comprendidos entre R3 y R5, con el objetivo de determinar la eficacia simbiótica de las bacterias fijadoras de nitrógeno presentes en los nódulos radiculares.

En cada parcela se seleccionaron tres plantas, distribuidas en distintos puntos, con el fin de representar la variabilidad interna. La extracción se realizó posteriormente a una lluvia, utilizando pala, lo que permitió retirar las plantas minimizando el daño al sistema radicular. Las raíces fueron lavadas cuidadosamente para remover el suelo adherido y evitar la pérdida de nódulos.

En cada planta se evaluaron las siguientes variables:

- número total de nódulos,
- tamaño de los nódulos,
- posición de los nódulos (raíces principales o secundarias),
- color interno de los nódulos, seccionando entre dos y tres nódulos por planta para determinar su actividad (rosado/rojo = activo; verde/marrón = inactivo).

A partir de estas variables se asignó un score de nodulación individual, de acuerdo con la escala propuesta por Rizobacter para soja en estadios R3–R5 (Anexo B). Los valores obtenidos se promediaron a nivel de parcela para su análisis estadístico (Rizobacter, comunicación personal, 2024).

### 3.5.3 Evaluación de maduración del grano

La maduración fisiológica del grano se evaluó en dos fechas: 26 de marzo de 2025 y 15 de abril de 2025. En cada parcela se seleccionaron cinco vainas al azar, provenientes de distintas plantas y del estrato medio–alto del cultivo.

Los granos extraídos fueron pesados en fresco y posteriormente secados en estufa, registrándose el peso seco. A partir de estos datos se calculó el contenido de humedad del

grano, utilizándose este indicador para determinar el avance del cultivo hacia la madurez fisiológica y definir el momento óptimo de cosecha.

### **3.5.4 Estimación del rendimiento a partir de componentes**

Previo a la cosecha, el 15 de abril de 2025, se realizó una estimación orientativa del rendimiento a partir del relevamiento de algunos componentes del rendimiento, con el objetivo de obtener una referencia general del potencial productivo del cultivo bajo los distintos tratamientos.

En cada parcela se seleccionaron dos tramos de 0,5 m lineal, correspondientes a dos líneas distintas, lo que representó un metro lineal total de hilera. A partir de esta información, y considerando una distancia entre hileras de 0,38 m, se estimó la densidad de plantas por unidad de superficie ( $\text{plantas m}^{-2}$ ). En dichos tramos se contabilizó el número de plantas y el número de vainas por planta.

Posteriormente, se seleccionaron 15 vainas por línea, las cuales fueron abiertas para determinar el número de granos por vaina. A partir de estos datos se estimó el número de granos por metro cuadrado, y el rendimiento potencial se calculó utilizando un peso promedio de mil granos (PMG) de 162 g, valor tomado de la ficha técnica de la variedad de soja DM 60I62 IPRO, correspondiente al material genético utilizado en el experimento.

Esta estimación tuvo un carácter orientativo y exploratorio, sin ser utilizada para la comparación estadística entre tratamientos. El rendimiento final del experimento se determinó exclusivamente mediante la cosecha experimental, considerándose este último como el dato definitivo para el análisis productivo.

### **3.5.5 Cosecha experimental y rendimiento final**

La cosecha experimental se realizó el 29 de abril de 2025, mediante un muestreo estandarizado. En cada parcela se utilizó un cuadrante de 1 m<sup>2</sup> como unidad de muestreo, dentro del cual se recolectaron todas las plantas presentes.

El material recolectado fue llevado a una trilladora estacionaria, donde se separó el grano, el cual fue posteriormente pesado en una balanza de precisión. A partir de estos datos se calculó el rendimiento final, expresado en kilogramos por hectárea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

### 3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos en el presente ensayo fueron analizados mediante herramientas estadísticas adecuadas al tipo de variable y a la estructura experimental.

Las variables continuas correspondientes a los componentes del rendimiento (rendimiento final) y a la nodulación del cultivo fueron analizadas mediante un Análisis de la Varianza (ANAVA). En el caso de la nodulación, dado que se evaluaron tres plantas por parcela, consideradas submuestras dentro de una misma unidad experimental, se utilizó un modelo con anidamiento de plantas dentro de parcela, con el fin de representar adecuadamente la variabilidad intra-parcela. Cuando el ANAVA no detectó diferencias significativas entre tratamientos, no se procedió a comparaciones múltiples de medias. En los casos en que correspondió, las comparaciones se realizaron mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

Las variables de nodulación que integraron el score promedio (número, tamaño, posición y color de nódulos), por presentar naturaleza ordinal, fueron analizadas de forma complementaria mediante la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, con el objetivo de evaluar posibles diferencias entre tratamientos que pudieran no ser detectadas al trabajar con promedios.

La fitotoxicidad del cultivo, evaluada a través de la escala ordinal EWRS en distintos momentos posteriores a la aplicación de los tratamientos, fue analizada mediante pruebas no paramétricas. En cada fecha de evaluación se aplicó la prueba de Kruskal–Wallis para detectar diferencias entre tratamientos. Adicionalmente, se utilizó la prueba de Friedman con el fin de considerar la variabilidad entre repeticiones y controlar la variabilidad entre repeticiones, dada su mayor sensibilidad para detectar diferencias en variables ordinales evaluadas en parcelas relacionadas.

Asimismo, para profundizar el análisis de la fitotoxicidad, se realizaron tablas de contingencia comparando la distribución de frecuencias de las categorías EWRS entre tratamientos y el testigo, aplicando la prueba de Chi-cuadrado. Este análisis permitió evaluar asociaciones en los perfiles de distribución de los niveles de daño, complementando la información obtenida a partir de las pruebas de rangos.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software InfoStat (versión 2020), estableciendo un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 FITOTOXICIDAD DEL CULTIVO

Luego de la aplicación de los tratamientos de herbicidas, se observaron síntomas de fitotoxicidad en el cultivo de soja, los cuales variaron en intensidad según el tratamiento y el momento de evaluación. Los síntomas registrados consistieron principalmente en lesiones necróticas irregulares en láminas foliares, clorosis localizada y manchas de aspecto quemado, predominantes en hojas completamente expandidas del estrato medio y superior de la planta. No se observaron deformaciones severas, muerte de plantas ni afectación visible de los puntos de crecimiento.

En la evaluación realizada a los 5 días posteriores a la aplicación, el análisis mediante la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis indicó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ). La comparación de rangos mostró que el tratamiento T3 (S-metolaclor) presentó los mayores valores de fitotoxicidad, diferenciándose del resto de los tratamientos, mientras que el tratamiento T6 (S-metolaclor + Detox) exhibió valores elevados, con un comportamiento intermedio respecto a los demás tratamientos.

**Tabla 3**

*Fitotoxicidad del cultivo a los 5 días (EWRS). Resultado de Kruskal–Wallis*

| Tratamiento | Descripción del tratamiento        | Medianas | Ranks |   |   |
|-------------|------------------------------------|----------|-------|---|---|
| T1          | Fomesafen                          | 1        | 13,10 | A | B |
| T2          | Fomesafen + Benazolin etil         | 1        | 10,00 | A |   |
| T3          | S-metolaclor                       | 3        | 24,40 |   | C |
| T4          | Fomesafen + Detox                  | 1        | 10,00 | A |   |
| T5          | Fomesafen + Benazolin etil + Detox | 1        | 13,10 | A | B |
| T6          | S-metolaclor + Detox               | 3        | 22,40 | B | C |

*Nota.* Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas. Prueba de Kruskal–Wallis,  $p = 0,0034$ .

**Figura 1**

*Plantas correspondientes al tratamiento testigo (TC), sin aplicación, a los 5 días posteriores*

**Figura 2**

*Síntomas de fitotoxicidad a los 5 días posteriores a la aplicación del tratamiento T3 (S-metolaclor)*



### Figura 3

*Síntomas de fitotoxicidad a 5 días en T6 (S-metolaclor + PROGEN Detox)*



La mayor expresión inicial de síntomas en los tratamientos que incluyeron S-metolaclor concuerda con lo reportado para herbicidas que interfieren en procesos metabólicos tempranos del cultivo, los cuales pueden inducir manifestaciones visibles de estrés en estadios vegetativos iniciales. En este sentido, los síntomas observados —manchas necróticas foliares y clorosis localizada— son compatibles con procesos de estrés oxidativo transitorio generados por la acción del herbicida sobre los tejidos fotosintéticamente activos (Rojas Garcidueñas & Gámez González, 2002; *S-Maestro*, s.f.). No obstante, la selectividad de este tipo de herbicidas se basa en la capacidad del cultivo para metabolizar y detoxificar el principio activo, permitiendo la recuperación posterior de los tejidos afectados (Anzalone, 2010).

El análisis mediante la prueba de Friedman resultó significativo en esta fecha ( $p < 0,01$ ). Este análisis evidenció que los tratamientos T3 y T6 presentaron niveles de fitotoxicidad significativamente superiores al resto de los tratamientos, mostrando ambos una separación clara en términos de rangos promedio.

**Tabla 4**

*Fitotoxicidad del cultivo (escala EWRS) a 5 días tras la aplicación según prueba de Friedman*

| Tratamiento | Descripción del tratamiento        | Suma  | Media | n |   |   |     |
|-------------|------------------------------------|-------|-------|---|---|---|-----|
| T1          | Fomesafen                          | 15    | 3,00  | 5 | A | B | C   |
| T2          | Fomesafen + Benazolin etil         | 12,00 | 2,40  | 5 | A | B |     |
| T3          | S-metolaclor                       | 26,00 | 5,20  | 5 |   |   | E   |
| T4          | Fomesafen + Detox                  | 12,00 | 2,40  | 5 | A |   |     |
| T5          | Fomesafen + Benazolin etil + Detox | 15,50 | 3,10  | 5 | A | B | C D |
| T6          | S-metolaclor + Detox               | 24,50 | 4,90  | 5 |   |   | E   |

*Nota.* Prueba de Friedman,  $p = 0,0015$ .

La separación del tratamiento T6 detectada por la prueba de Friedman puede atribuirse a la consistencia en la aparición de síntomas foliares entre repeticiones, ya que este método es particularmente sensible a patrones repetidos dentro de cada unidad experimental. En este sentido, si bien T3 presentó la mayor expresión de fitotoxicidad, T6 mostró un comportamiento similar en la mayoría de las parcelas durante esta evaluación temprana, reflejando una respuesta homogénea del cultivo frente al principio activo. Indicando hasta la fecha, que el Detox no modificó el perfil de detoxificación del s- metolaclor.

De forma complementaria, se realizó un análisis de contingencia, comparando los perfiles de distribución de las categorías de fitotoxicidad entre cada tratamiento y el testigo. En la evaluación del 24 de diciembre, este análisis mostró una asociación

significativa entre los tratamientos T3 y T6 y los niveles de fitotoxicidad respecto al testigo ( $p < 0,05$ ), evidenciando una mayor frecuencia de categorías de daño intermedio en ambos tratamientos.

**Tabla 5**

*Distribución de categorías EWRS a los 5 días posteriores a la aplicación*

| Tratamiento | Descripción del tratamiento | EWRS 1 | EWRS 2 | EWRS 3 | EWRS 4 | Total |
|-------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| TC          | Testigo (sin aplicación)    | 5      | 0      | 0      | 0      | 5     |
| T3          | S-metolaclor                | 0      | 2      | 2      | 1      | 5     |
| T6          | S-metolaclor + Detox        | 1      | 0      | 4      | 0      | 5     |

*Nota.* Chi-cuadrado MV-G2 significativo ( $p < 0,05$ ), indicando diferencias en la distribución de categorías de fitotoxicidad (EWRS) de T3 y T6 respecto al testigo.

Este resultado refuerza la interpretación obtenida mediante las pruebas de rangos, indicando que la fitotoxicidad observada en los tratamientos con S-metolaclor no solo fue superior en términos de valores promedio, sino que también presentó una distribución diferencial de las categorías EWRS, asociada principalmente a síntomas foliares visibles y de carácter no letal.

En la evaluación realizada el 3 de enero (V6–V7), si bien algunos tratamientos presentaron valores relativamente superiores de fitotoxicidad, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos mediante las pruebas globales aplicadas.

Del mismo modo, en las evaluaciones realizadas a los 30 y 45 días posteriores a la aplicación, correspondientes a los estadios V8–V9 y R1, tampoco se registraron diferencias significativas en los niveles de fitotoxicidad, observándose una progresiva homogeneización de los valores de la escala EWRS entre tratamientos.

**Tabla 6***Fitotoxicidad del cultivo (escala EWRS) en distintas fechas de evaluación*

| Tratamiento | Descripción del tratamiento           | Media<br>03/01/2025 | Media<br>17/01/2025 | Media<br>31/01/2025 |
|-------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| T1          | Fomesafen                             | 2,90                | 3,30                | 3,50                |
| T2          | Fomesafen +<br>Benazolin etil         | 3,30                | 3,30                | 3,50                |
| T3          | S-metolaclor                          | 5,10                | 3,30                | 3,50                |
| T4          | Fomesafen + Detox                     | 2,90                | 3,30                | 3,50                |
| T5          | Fomesafen +<br>Benazolin etil + Detox | 3,40                | 3,90                | 3,50                |
| T6          | S-metolaclor + Detox                  | 3,40                | 3,90                | 3,50                |
| p-valor     |                                       | 0,3461              | 0,5878              | --                  |

*Nota.* No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ninguna de las fechas evaluadas ( $p > 0,05$ ). Valores correspondientes a medias de la escala EWRS, adaptada de Kuttel et al. (2016).

Estos resultados indican que la fitotoxicidad observada fue temprana y transitoria, concentrándose en los primeros días posteriores a la aplicación de los tratamientos y sin persistencia en estadios fenológicos más avanzados.

Desde el punto de vista fisiológico, la recuperación observada puede explicarse por la alta capacidad de compensación del cultivo de soja, caracterizado por una marcada plasticidad frente a situaciones de estrés de corta duración. La regulación hormonal endógena y la activación de mecanismos antioxidantes y de detoxificación permiten restablecer el crecimiento y el funcionamiento metabólico luego de eventos de estrés químico transitorios, siempre que estos no coincidan con períodos críticos del desarrollo del cultivo (Anzalone, 2010; Yakhin et al., 2017).

Si bien la bibliografía señala que los bioestimulantes pueden contribuir a la mitigación del estrés oxidativo y favorecer la recuperación fisiológica de los cultivos mediante la modulación hormonal (IFA, s.f.), en el presente ensayo no se observaron diferencias estadísticamente significativas atribuibles a la aplicación del bioestimulante, ni en la intensidad ni en la duración de la fitotoxicidad. Esto sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, la capacidad intrínseca de recuperación del cultivo de soja habría sido suficiente para compensar el estrés generado por los herbicidas, sin evidenciarse un efecto adicional asociado al uso del bioestimulante.

En conjunto, los resultados indican que la fitotoxicidad observada no coincidió con períodos críticos del cultivo y no presentó efectos persistentes, reforzando la importancia de interpretar los síntomas visuales en función de su momento de aparición, duración y reversibilidad, más que como un indicador directo de impacto productivo.

## 4.2 NODULACIÓN DEL CULTIVO

El ANAVA del *score* promedio de nodulación no detectó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ( $p = 0,1360$ ), lo que indica que la aplicación de los herbicidas evaluados, tanto solos como en combinación con el bioestimulante, no generó efectos diferenciados sobre la nodulación del cultivo. En cambio, el efecto del anidamiento de plantas dentro de parcela resultó significativo ( $p = 0,0433$ ), evidenciando la existencia de variabilidad natural entre las plantas evaluadas dentro de una misma parcela, independiente del tratamiento aplicado. Este resultado justifica el uso del modelo con anidamiento para el análisis de la nodulación.

**Tabla 7**

*Análisis de la varianza (ANAVA) del score promedio de nodulación del cultivo de soja*

| Fuente de variación         | gl | CM   | F    | p-valor |
|-----------------------------|----|------|------|---------|
| Tratamiento                 | 6  | 0,79 | 1,69 | 0,1360  |
| Tratamiento /<br>Repetición | 28 | 0,78 | 1,67 | 0,0433  |
| Error                       | 70 | 0,47 | —    | —       |

Con el fin de profundizar la interpretación de estos resultados y evaluar si el uso de un *score* promedio podía estar enmascarando posibles diferencias en las variables que lo componen, se realizaron análisis complementarios considerando por separado el número, tamaño, posición y color interno de los nódulos. Dado el carácter ordinal de estas variables, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, no detectándose diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para ninguna de ellas ( $p > 0,05$ ).

En términos generales, las variables que componen la nodulación presentaron valores similares entre tratamientos. El número total de nódulos y su posición mostraron medianas comprendidas entre 3 y 4, mientras que el tamaño de los nódulos se ubicó mayoritariamente entre 2 y 3. El color interno de los nódulos presentó valores consistentes con una nodulación funcional, sin diferencias entre tratamientos. El *score* promedio de nodulación se situó en torno a 3, indicando una nodulación adecuada y homogénea en todo el ensayo.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que, bajo las condiciones del presente ensayo, la nodulación del cultivo de soja no fue afectada por la aplicación de los herbicidas evaluados ni por la incorporación del bioestimulante. La ausencia de diferencias entre tratamientos sugiere que el proceso de simbiosis rizobio–leguminosa se mantuvo estable, y que la variabilidad observada respondió principalmente a diferencias entre plantas dentro de una misma parcela, más que a efectos atribuibles a los tratamientos aplicados.

#### **4.3 RENDIMIENTO FINAL DEL CULTIVO**

El análisis estadístico no detectó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ( $p = 0,2374$ ), indicando que ninguno de los tratamientos evaluados generó un efecto diferencial sobre el rendimiento final del cultivo (tabla n°8). El coeficiente de variación obtenido ( $CV = 17,86 \%$ ) se considera aceptable para ensayos de rendimiento a campo, reflejando la variabilidad natural del sistema productivo.

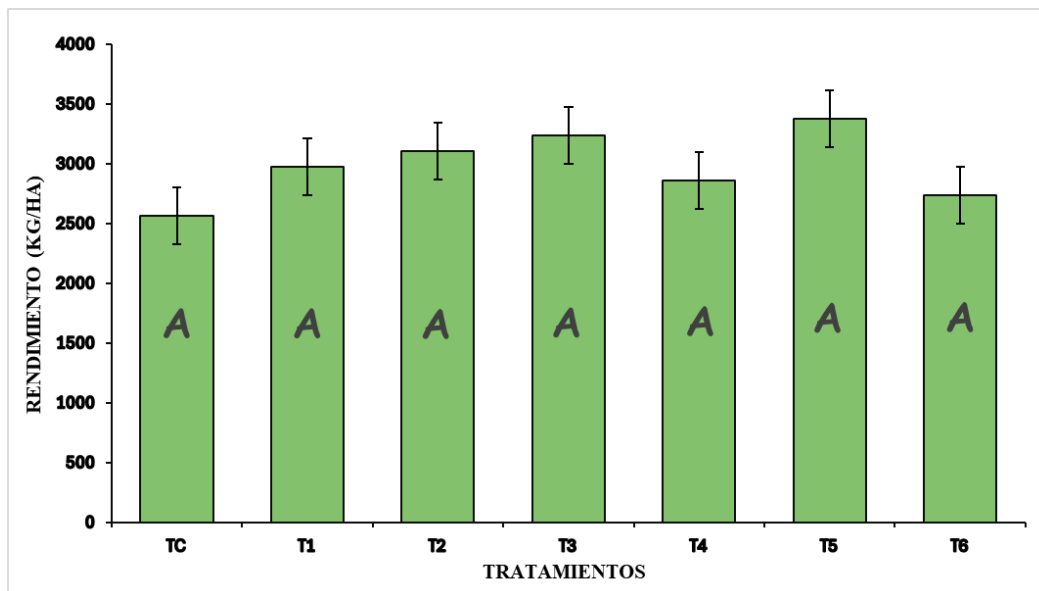
**Tabla 8**

*Rendimiento final del cultivo de soja (kg ha<sup>-1</sup>). Análisis de la varianza (ANAVA)*

| Fuente de variación | gl | CM        | F    | p-valor |
|---------------------|----|-----------|------|---------|
| Tratamiento         | 6  | 405344,91 | 1,43 | 0,2374  |
| Error               | 28 | 282855,09 | —    | —       |

**Figura 4**

*Rendimiento del cultivo de soja según tratamiento aplicado (kg/ha)*



*Nota.* Barras representan medias  $\pm$  error estándar. Medias con una letra común no difieren significativamente ( $p > 0,05$ ).

Si bien se observaron diferencias numéricas entre tratamientos, con rendimientos que oscilaron entre 2563 y 3377 kg ha<sup>-1</sup>, estas no resultaron estadísticamente significativas, por lo que no pueden atribuirse a los tratamientos aplicados. En consecuencia, dichas variaciones deben interpretarse como parte de la variabilidad propia del cultivo y del ambiente, y no como una respuesta directa a la aplicación de herbicidas o del bioestimulante.

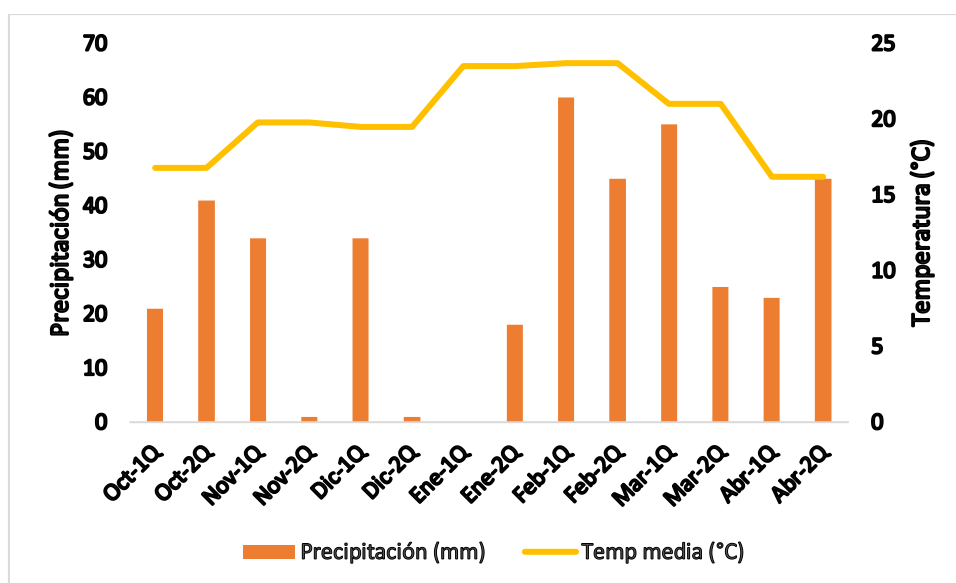
La ausencia de diferencias en rendimiento es coherente con los resultados obtenidos en las evaluaciones de fitotoxicidad, donde los síntomas observados fueron tempranos y transitorios, sin persistencia en etapas fenológicas críticas. Asimismo, la estabilidad observada en la nodulación sugiere que el funcionamiento fisiológico del cultivo no se vio comprometido, lo que habría permitido al cultivo mantener su capacidad productiva independientemente del tratamiento aplicado.

La bibliografía indica que las respuestas productivas asociadas al uso de bioestimulantes son altamente dependientes del ambiente, del tipo de estrés y de las condiciones de manejo, sin presentar un patrón consistente de incremento en rendimiento (Saborío, 2002; Yakhin et al., 2017). La ausencia de diferencias estadísticamente significativas observada en el presente ensayo se encuentra dentro de la variabilidad esperable reportada para este tipo de insumos.

En este contexto, resulta pertinente considerar las condiciones ambientales registradas durante la campaña (Figura 5), dado que la disponibilidad hídrica y la dinámica térmica influyen directamente en la expresión de síntomas y en la capacidad de recuperación del cultivo.

**Figura 5**

*Precipitaciones y temperatura media quincenal durante la campaña 2024–2025*



*Nota.* Precipitaciones acumuladas por quincena y temperatura media correspondiente al período evaluado. Datos registrados en el sitio experimental.

La distribución de las precipitaciones presentó variaciones interquincenales marcadas, alternándose períodos de menor disponibilidad hídrica con eventos de lluvia de mayor magnitud. Esta dinámica pudo haber favorecido la capacidad de compensación fisiológica del cultivo, contribuyendo a la estabilidad observada en el rendimiento final y a la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

En conjunto, los resultados indican que, bajo las condiciones del presente ensayo, la aplicación de los herbicidas evaluados, tanto solos como en combinación con el bioestimulante, no afectó de manera significativa el rendimiento final del cultivo de soja.

## 5 CONCLUSIONES

La incorporación del bioestimulante no modificó de manera significativa la respuesta del cultivo a los diferentes tratamientos herbicidas, para las condiciones experimentales a las que estuvo expuesto.

En términos de fitotoxicidad, se observaron síntomas iniciales principalmente en los tratamientos que incluyeron S-metolaclor; sin embargo, estos fueron de carácter visual y transitorio, sin persistencia en etapas fenológicas posteriores, los síntomas tempranos no se tradujeron en pérdidas productivas.

Los resultados obtenidos deben interpretarse dentro del contexto ambiental en el que se desarrolló el experimento, caracterizado por una dinámica hídrica variable y por la capacidad de compensación fisiológica propia del cultivo de soja. En consecuencia, la evaluación de bioestimulantes en combinación con herbicidas requiere ser abordada en distintos ambientes y escenarios de estrés para determinar con mayor precisión su potencial agronómico.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AgroEfetiva. (2021). *Depoimento ProgenDetox Dr. Ulisses Antuniassi* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=fyX4bsaFXgM>
- Alcántara Cortes, J. S., Acero Godoy, J., Alcántara Cortés, J. D., & Sánchez Mora, R. M. (2019). *Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal*. *NOVA*, 17(32), 109-129.  
<https://es.scribd.com/document/494915729/Principales-Reguladores-Hormonales-y-Sus-Interacciones-en-El-Crecimiento-Vegetal>
- Anzalone, A. (2010). *Detoxificación de herbicidas en plantas*. ResearchGate.  
[https://www.researchgate.net/publication/259175682\\_DETOKIFIKACION\\_DE\\_HERBICIDAS\\_EN\\_PLANTAS](https://www.researchgate.net/publication/259175682_DETOKIFIKACION_DE_HERBICIDAS_EN_PLANTAS)
- Asunción-Cruz, E., Villa-Torres, J. A., Hernández-Domínguez, E. M., López-Vázquez, E., & Álvarez-Cervantes, J. (2021). Función, identificación e importancia de fitohormonas: Una revisión. *Biotechnología Vegetal*, 21(4), 178-192.  
<https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/710/pdf>
- Barbaś, P., Pietraszko, M., Pszczółkowski, P., Skiba, D., & Sawicka, B. (2024). Assessing phytotoxic effects of herbicides and their impact on potato cultivars in agricultural and environmental contexts. *Agronomy*, 14(1), Artículo e85.  
<https://www.mdpi.com/2073-4395/14/1/85>
- Caseley, J. C. (1996). Herbicidas. En R. Labrada, J. C. Caseley & C. Parker (Eds.), *Manejo de malezas para países en desarrollo*. FAO.  
<https://www.fao.org/4/t1147s/t1147s0e.htm>
- Di Sario, L., Boeri, P., Matus, J. T., & Pizzio, G. A. (2025). Plant biostimulants to enhance abiotic stress resilience in crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(3), Artículo e1129. <https://doi.org/10.3390/ijms26031129>
- Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in Microbiology*, 8, Artículo e2104. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104>

- Ernst, O., & Siri-Prieto, G. (2011). La agricultura en Uruguay: Su trayectoria y consecuencias. En E. Hoffman (Coord.) & A. Ribeiro (Ed.), *II Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 149-163). Universidad de la República.
- Fomeflag Plus: Herbicida selectivo para soja.* (s.f.). Rainbow.  
<https://www.rainbowagrolatam.com/descargar-documento2-326/productos-31839d1d62c26b6a0764af469bb3787a>
- Fomeflag: Fomesafen 250 g/L SL.* (s.f.). Rainbow.  
<https://www.rainbowagrolatam.com/descargar-documento2-320/productos-97f8e4bb6031705bc13f6de844a9ae6f>
- Gonzalez, N., Eyherabide, J. J., Barcelonna, M. I., Gaspari, A., & Sanmartino, S. (1999). Effect of soil interacting herbicides on soybean nodulation in Balcarce, Argentina. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(7), 1167-1173.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000700008>
- Ingeplant Ingeniería en Nutrición de Cultivos. (2022). *Bioestimulantes en agricultura, definición, clases y regulación* [Video]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=aSMpQZ5nSNs>
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). 4.2.6. Cantidad de explotaciones comerciales y superficie explotada, según principal fuente de ingreso – 2011. En *Anuario Estadístico Nacional 2024*. <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww5.ine.gub.uy%2Fdocuments%2FANUARIOS%2FAnuario%25202024%2F4%2520-%2520SECTORES%2520ECON%25C3%2593MICOS%2F4.2%2520Agropecuario%2F4.2.6ok.xls&wdOrigin=BROWSELINK>
- International Fertilizer Association. (s.f.). *Biostimulants*.  
<https://www.fertilizer.org/science/emerging-products-and-services/plant-biostimulants/>
- Jordán, M., & Casaretto, J. (2006). *Hormonas y reguladores del crecimiento: Auxinas, giberelinas y citocininas*. En F. A. Squeo & L. Cardemil (Eds.), *Fisiología vegetal* (pp. 1-28). Universidad de La Serena.  
<https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Auxinasgiberelinasycitocininas.pdf>

- King, C. A., Purcell, L. C., & Vories, E. D. (2001). Plant growth and nitrogenase activity of glyphosate-tolerant soybean in response to foliar glyphosate applications. *Agronomy Journal*, 93(1), 179-186.  
<https://doi.org/10.2134/agronj2001.931179x>
- Kuttel, W., Metzler, M., & Pividori, S. (2016). Evaluación exploratoria de alternativas para control químico de malezas en sorgo granífero (*Sorghum bicolor*). *Revista técnica de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa*, 23, 136-142. [https://issuu.com/aapresid/docs/revista\\_tecnica\\_may\\_z\\_2016/143](https://issuu.com/aapresid/docs/revista_tecnica_may_z_2016/143)
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (1979). *Descripción de grupos de suelos CONEAT*. [https://vieragro.com.uy/wp-content/uploads/2019/05/descripcion\\_de\\_grupos\\_de\\_suelos\\_coneat-1.pdf](https://vieragro.com.uy/wp-content/uploads/2019/05/descripcion_de_grupos_de_suelos_coneat-1.pdf)
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2024). *Anuario estadístico agropecuario 2024*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/diea/anuario2024>
- Porta, H., & Jiménez-Nopala, G. (2019). Papel de las hormonas vegetales en la regulación de la autofagia en plantas. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 22, Artículo e160.  
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.160>
- Rojas Garcidueñas, M., & Gámez González, H. (2002). Herbicidas de origen natural. *Ciencia UANL*, 5(2), 160–164. <https://www.redalyc.org/pdf/402/40250204.pdf>
- Saborío, F. (2002). Bioestimulantes en fertilización foliar. En G. Meléndez & E. Molina (Eds.), *Fertilización foliar: Principios y aplicaciones* (pp. 107-124). Universidad de Costa Rica; ACCS. [https://www.academia.edu/17228265/Memoria\\_Curso\\_Fertilizaci%C3%B3n\\_Foliar](https://www.academia.edu/17228265/Memoria_Curso_Fertilizaci%C3%B3n_Foliar)
- S-Maestro: Herbicida preemergente sistémico para cultivos extensivos*. (s.f.). Rainbow. <https://www.rainbowagrolatam.com/descargar-documento2-303/productos-336e6f7ef361fb9d01b84a4f8b8d02ea>

- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6<sup>th</sup> ed.). Sinauer Associates.  
[https://sirsyedcollege.ac.in/crm/public/uploads/download\\_image/H8aTDrHeKuTogISO7SE1r80gjP2dmU.pdf](https://sirsyedcollege.ac.in/crm/public/uploads/download_image/H8aTDrHeKuTogISO7SE1r80gjP2dmU.pdf)
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, Artículo e2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zobiole, L. H. S., Oliveira, Jr., R. S., Visentainer, J. V., Kremer, R. J., Bellaloui, N., & Yamada, T. (2010). Glyphosate affects seed composition in glyphosate-resistant soybean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(7), 4517-4522.  
<https://doi.org/10.1021/jf904342t>

## 7 ANEXOS

### Anexo A

#### *Análisis físico-químico del suelo del sitio experimental*

| Alt Campo ID:      |        |               | Campo ID:            |      |       |        |          | Firma                   |          |
|--------------------|--------|---------------|----------------------|------|-------|--------|----------|-------------------------|----------|
| Numero Lab. 14964  |        |               | Muestra Maíz testigo |      |       |        |          |                         |          |
| Determinaciones    | Método | Resultados    | CALIFICACION         |      |       |        |          | Capacidad Int.catiónica |          |
|                    |        |               | Muy Bajo             | Bajo | Medio | Optimo | Muy Alto | 23.2 meq/100g           |          |
| pH Suelo           | 1:1    | 5.0           |                      |      |       |        |          | Saturación Catiónica    |          |
| Indice de Encalado | SMP    | 6.10          |                      |      |       |        |          | %sat                    | meq      |
| Materia orgánica   | LOI    | 5.1 % ENR 146 |                      |      |       |        |          | K                       | 2.0 0.5  |
| Fósforo (P) (Bray) | P1     | 98 ppm        |                      |      |       |        |          | Ca                      | 42.6 9.9 |
| Potasio (K)        | M3     | 180 ppm       |                      |      |       |        |          | Mg                      | 14.0 3.2 |
| Calcio (Ca)        | M3     | 1976 ppm      |                      |      |       |        |          | H                       | 40.9 9.5 |
| Magnesio (Mg)      | M3     | 389 ppm       |                      |      |       |        |          | Na                      | 0.5 0.1  |
| Azufre (S-SO4)     | M3     | 10 ppm        |                      |      |       |        |          | K:Mg: 0.14              |          |
| Boro (B)           | M3     | 0.6 ppm       |                      |      |       |        |          | Ca:Mg: 3.04             |          |
| Cobre (Cu)         | M3     | 1.7 ppm       |                      |      |       |        |          |                         |          |
| Hierro (Fe)        | M3     | 242 ppm       |                      |      |       |        |          |                         |          |
| Manganeso (Mn)     | M3     | 62 ppm        |                      |      |       |        |          |                         |          |
| Zinc (Zn)          | M3     | 1.3 ppm       |                      |      |       |        |          |                         |          |
| Sodio (Na)         | M3     | 26 ppm        |                      |      |       |        |          |                         |          |
| Conductividad      |        |               |                      |      |       |        |          |                         |          |
| Nitrógeno-Nitrato  | oil NO | 30 ppm        |                      |      |       |        |          |                         |          |
| Phosphorus (P)     | M3     | 130 ppm       |                      |      |       |        |          |                         |          |
|                    |        |               |                      |      |       |        |          |                         |          |
|                    |        |               |                      |      |       |        |          |                         |          |

*Nota.* Análisis físico-químico del suelo realizado previo a la instalación del ensayo, correspondiente al lote experimental. Los resultados se presentan según la calificación de suficiencia utilizada por el laboratorio. El informe fue provisto por Waypoint Analytical (comunicación personal, 2024).

## Anexo B

### Escala de Rizobacter

#### EVALUACIÓN EN ESTADIO REPRODUCTIVO R3-R5.

| PARÁMETRO/PUNTOS                                    | 1                                                                                                          | 2                                                                                                                         | 3                                                                                                         | 4                                                                                                                        | 5                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Número total de nódulos                             | Ninguno                                                                                                    | Escasos < 5                                                                                                               | Pocos > 5                                                                                                 | Alto $\geq 10$                                                                                                           | Muy alto $\geq 20$                                                                                               |
| Tamaño de los nódulos                               | Muy pequeños < 2 mm                                                                                        | Pequeños 2-3 mm                                                                                                           | Medianos 3-4 mm                                                                                           | Grandes 4-6 mm                                                                                                           | Muy grandes $\geq 6$ mm                                                                                          |
| Posición de los nódulos                             | En raíces secundarias<br> | Principalmente en raíces secundarias<br> | Distribución similar<br> | Principalmente en raíces primarias<br> | Todos en raíces primarias<br> |
| Color*                                              |                           |                                          |                          |                                        |                               |
| Funcionalidad                                       | Verde o marrón                                                                                             | Principalmente verde o marrón                                                                                             | Colores diversos (verde, marrón, rojo)                                                                    | Principalmente marrón y rojo                                                                                             | Rojo                                                                                                             |
| FBN estimada a través del color interior del nódulo |                        |                                                                                                                           |                                                                                                           |                                                                                                                          |                                                                                                                  |
|                                                     | No efectivos o fijación nula                                                                               |                                                                                                                           |                                                                                                           |                                                                                                                          | Fijación efectiva                                                                                                |

\* Los nódulos activos son rojos por dentro, lo que indica que las bacterias están vivas y activas. Los nódulos muertos, inactivos y senescentes suelen ser de color verde grisáceo o marrón por dentro.

*Nota.* Escala utilizada para la evaluación de la nodulación en estadio reproductivo R3–R5. Material técnico provisto por Rizobacter (comunicación personal, 2024).